

# 固态故障电流限制器(FCL)的应用与发展

陈金祥<sup>1</sup>, 董恩源<sup>2</sup>, 邹积岩<sup>2</sup>

(1. 华中理工大学, 湖北 武汉 430074; 2. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 叙述了故障电流限制器的定义、要求, 并对各种固态故障电流限制器的限流原理、特性进行分析、比较, 评述了其优缺点与发展前景。

**关键词:** 故障电流限制器

**中图分类号:** TM713

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1003-4897(2000)12-0035-03

## 1 引言

随着国民经济的飞速发展, 社会对电力的需求不断增加, 带动了电力系统的不断发展, 单机和发电厂容量、变电所容量、城市和工业中心负荷不断增加, 就使得电力系统之间互联, 各级电网中的短路电流水平不断增长, 资料<sup>[1]</sup>表明, 金沙江电站送电后的500kV主网短路电流超过50kA。这就要求电网内各种电气设备, 如断路器、变压器、互感器以及变电站的母线、构架、导线、支撑瓷瓶等, 必须满足短路电流水平提高所带来的更苛刻的要求。

更换断路器以及相关的电气设备是一种方案, 但有下列问题:

- A. 更换设备投资巨大;
- B. 在更换设备期间, 电网系统的可靠性大大降低;
- C. 目前合乎容量要求的设备, 在不远的将来, 设备容量就可能不能满足短路电流水平了。

因此, 系统中限制短路电流成为一个迫切的问题。

## 2 短路电流限制器的定义、要求

短路电流限制器 FCL (Fault Current Limiter) 是一种串接在线路中的电气设备。它正常时阻抗为 0 或很小, 而故障时阻抗很大。它必须满足下列要求:

- A. 它必须能限制故障短路电流的第一个峰值
- B. 正常运行时对系统没影响
- C. 动作时不造成过电压等副作用
- D. 故障后自动复位
- E. 成本较低, 能为电力部门所接受

## 3 固态 FCL 的发展

传统的限制短路电流手段是加装电抗器, 然而

它在系统正常运行时造成电压降落和能耗, 所以在 70 年代国际上就有人提出短路电流限制器<sup>[2]</sup>, 此后至 80 年代初期, 不断有人对此进行研究。这可视为 FCL 发展的第一阶段。其特点是使用机械开关, 其主要技术是针对灭弧问题, 但装置成本高, 速度慢, 难以限制短路电流的峰值, 故未能在电力系统中得到实际应用。从 80 年代中后期, 由于新技术的出现及原有技术的发展, 又有一系列新型的 FCL 被提出, 其中固态电流限制器 (Solid State Current Limiter), 因利用电力电子技术, 具有动作速度快、允许动作次数多、控制简便等优点, 在电力系统有着广阔的应用前景。目前, 见报道的有 1.2MVA/10.5kV 的样机在瑞士的某水电厂运行。

在早期, 固态限流器的开断元件为晶闸管, 由于晶闸管只有在电流过零时才能开断, 不能限制故障电流的首次峰值, 限制了其的应用。近年来, 随着自关断器件 (如 GTO 和 MCT) 的出现, 由于其可以准确地控制开断时刻, 并能解决故障电流的首次峰值限制问题, 给固态限流器的发展带来了新的转机。表 1 列出了当前各类功率器件的最高参数水平。

表 1 电力电子器件的最高参数水平

| 器件     | 国际           | 国内          |
|--------|--------------|-------------|
| SCR    | 3500A/6500V  | 1650A/4500V |
| GTR    | 800A/1200V   | 200A/1200V  |
| GTO    | 10000A/8000V | 2500A/4500V |
| MOSFET | 200A/1500V   | 4A/850V     |
| IGBT   | 1000A/1800V  | 30A/1200V   |
| SIT    | 250A/2000V   | 30A/800V    |
| SITH   | 2000A/4000V  | 100A/1000V  |
| MCT    | 1000A/2500V  | 10A/900V    |

由表 1 可见, 单个器件容量最大的为 GTO。

### 3.1 纯限流型的固态电流限制器

这类限流器的特点是利用电力电子器件的快速性使正常工作时处于串联谐振(阻抗  $Z = 0$ ) 状态下的 LC 电路在短路故障时脱谐, 或使正常工作下处于非谐振状态下的电路在短路故障时进入并联谐振(导纳)。

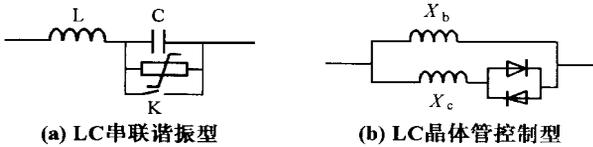


图 1

图 1(a) 为 LC 串联谐振式, 正常时 L、C 串联谐振, 阻抗为 0; 故障时, 开关 K 合闸, 旁路电容 C, 阻抗为  $jX_L$ ; 图 1(b) 为晶闸管控制型, 正常时阻抗为  $jX_s$  ( $X_s$  为  $X_b$  与  $X_c$  的并联值, 因  $X_c$  很小, 故  $X_s$  也很小), 故障时晶闸管开断, 阻抗为  $jX_b$  (很大)。

图 2 是利用 LC 谐振线路以及一个晶闸管控制的 可变阻抗组成的 FCL。

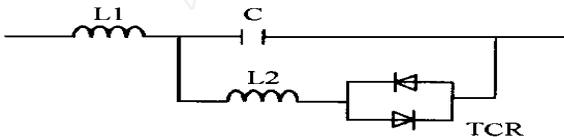


图 2 一种晶闸管控制的 可变阻抗的 FCL

其工作原理如下: 在正常情况下  $L_1$  与 C 串联谐振, TCR 关断, 使线路阻抗为 0。当故障时, 通过 TCR 的控制, 使  $L_2$ 、C 并联谐振, 使线路阻抗很大, 从而起到限流的作用。作为一种后备保护, 若故障时, 电容 C 受到破坏, 那么,  $L_1$  的阻抗应大到足以限制故障电流的水平。

图 3 为用 GTO 控制的 FCL 基本结构框图。它利用 GTO 作为线路开关, 故障时关断以接入限流阻抗 L, 从而限制短路电流。其限流的原理与图 1、图 2 不一样。电容元件作为缓冲回路用以限制 GTO 关断时两端的电压上升率  $du/dt$ 。氧化锌避雷器用以限制关断后装置两端的瞬时过电压幅值。短路电流的限制是通过限流电抗来实现的。

装置的工作过程可简略分析如下: FCL 动作前, 线路电流流经 GTO, 每周期内两只反并联的 GTO 轮流导通。当故障发生时, 检测系统动作, 并通过门控回路向 GTO 发出关断信号。于是 GTO 快速关断, 电流流过限流器通路。

### 3.2 带串联补偿型的电流限制器

把限流与串联补偿结合起来称之为限流串补,

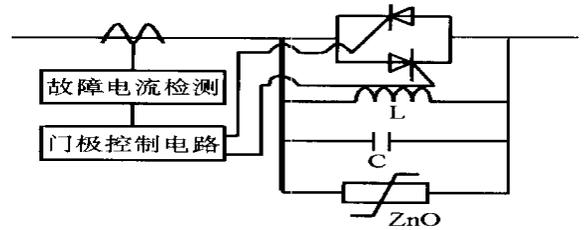


图 3 GTO 控制的 FCL 主电路图

可分为两种形式: 可控限流串补 TCSC 以及固定限流串补。图 4 为可控限流串补 TCSC 主电路示意图。

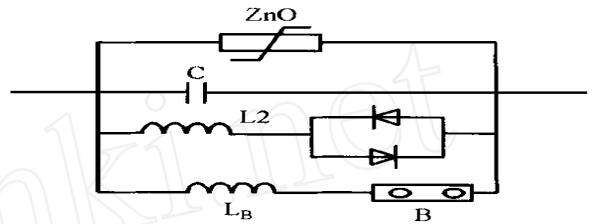


图 4 TCSC 电路图

TCSC 主要由四个元件组成: 电容器组 C、旁路电感 L、双向晶闸管 SCR 以及保护用的氧化锌限压器 MOV。此外还有旁路断路器 B 及电感  $L_B$  等。

TCSC 的工作模式可以分为下面四种。

#### (1) 晶闸管闭锁模式

这时 TCSC 容抗  $X = X_c = -j/ C$ , 与常规串补没有区别。

#### (2) 容抗调节模式

当  $\alpha_{crit} < \alpha < 180^\circ$ , TCSC 工作在图 5 所示的容性电抗调节范围内。

#### (3) 旁路模式

当  $\alpha = 90^\circ$  时, 在理想情况下每一个晶闸管的导通角  $\theta = 180^\circ$ , 电感 L 处于全接入状态, 相当于 L 和 C 的并联支路。

#### (4) 感抗调节模式

当  $90^\circ < \alpha < \alpha_{crit}$  时, TCSC 工作在感性电抗调节范围内。本方法的优点是限流串补是可调的, 可抑制线路谐波。

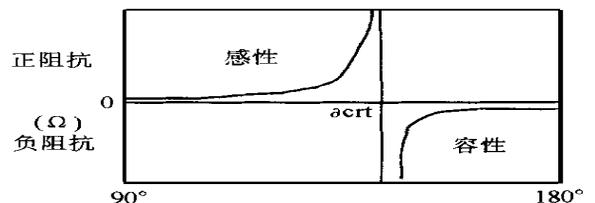


图 5 TCSC 电抗特性

图 6 为日本人提出的一种固定限流串补原理图<sup>[6]</sup>。

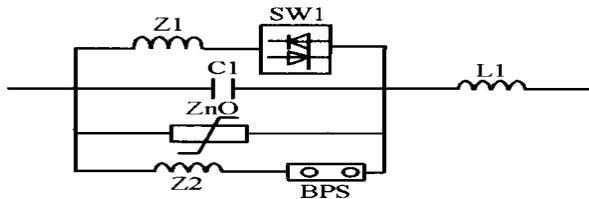


图6 固定串补限流原理图

主要元件为电容器组  $C$ 、电抗  $L_1$ ，且  $1/j C_1 > j L_1$ 。与  $C_1$  并联的线路开关  $SW_1$  是打开的，只有在线路故障时关合。在常规下， $L_1$ 、 $C_1$  线路是呈容性的，补偿线路的阻抗。与  $SW_1$  串联的阻抗  $Z_1$  很小，目的是为了阻止关合  $SW_1$  时的涌流。BPS 为旁路开关， $Z_2$  也很小，是为防止 BPS 关闭时大的涌流。 $ZnO$  为限压氧化锌避雷器。

其工作原理为：在正常状态下， $C_1$ 、 $L_1$  一起工作呈容性，线路起串补的作用；当线路故障时， $SW_1$  闭合， $C_1$  被旁路，只有  $L_1$  工作，那么  $L_1$  起限制线路故障电流的作用。

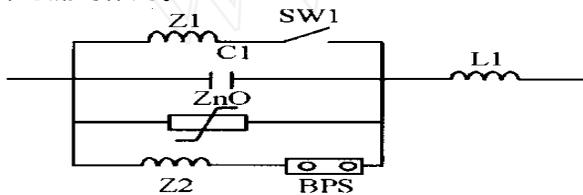


图7 新型 FCL 的结构框图

图7 为我们课题组提出的新型带串联补偿的故障电流限制器的基本原理图。

本 FCL 与图6 基于 GIO 的 FCL 最重要的区别在于元件  $SW_1$ ，它为真空触发间隙或用高速斥力机构操动的合闸开关。

真空间隙的点火时间在  $1 \sim 5\mu s$ ，用高速斥力机构操动的合闸开关的动作时间为  $1ms$  之内，它们都是快速动作的，且由于它们在线路中只是关合大电流而不是开断大电流，没有灭弧问题，这样，应用于中高压系统时，单个元件就可满足系统容量的要求，且制造成本低，这正是新型 FCL 的最大优点所在。

#### 4 结束语

(1) 由于 FCL 能把故障短路电流限制下来，对

提高输电线路的利用率、电力系统的稳定性的改善，降低整个电网的投资，具有重要的意义。

(2) 对于固态限流器，由于目前单个电子元件的耐压、通电流能力有限，应用于中高压电网时，需多个元件的串并联，要对它们进行协调控制。同时，由于所需的电子元件大多为进口的，设备成本昂贵，限制了其应用范围。

(3) 目前出现的真空触发间隙或用高速斥力机构操动的合闸开关，其动作时间可达  $1ms$  之内，把它引入到故障电流限制器，可解决传统机械式的电流限制器的速度慢，难以限制短路电流的峰值问题；同时，由于它们的单个元件就可满足系统容量的要求，应用于中高压系统时，与基于 GIO 的 FCL 相比，没有复杂的协调控制问题，且制造成本低，是一个可发展的方向。目前，样机正在研制之中。

#### 参考文献：

- [1] 杨杰,等.三峡水电站短路电流水平及限制措施分析.电网技术,1997,(7).
- [2] Falcome C A, Beehler J E et al. Current Limiting Device - - - A Utility's Need. IEEE Trans, PAS - 93, Nov. / Dev., 1974:1768 ~ 1775.
- [3] 徐国政. 固态断路器的应用和发展. 高压电器, 1998, (8).
- [4] Veda T, et al. Solid-State Current Limiter for Power Distribution System. IEEE Trans, PWRD - 8, Oct 1993: 1796 ~ 1801.
- [5] Smith R K, Slade P G et al. Solid-State Distribution Current Limiter and Circuit Application Requirement and Control Strategies. IEEE Trans, PWRD - 8, 1993, (3).
- [6] Sugimoto S, et al. Principle and Characteristics of a Fault Current Limiter with Series Compensation. IEEE Trans, PWRD, 1996, 11(2).

收稿日期：2000-05-08

作者简介：陈金祥(1973-)，男，博士研究生，主要研究方向为电力系统的故障限流；董恩源(1973-)，男，助教，主要研究方向为电力系统的故障限流；邹积岩(1954-)，男，教授，主要研究方向为高压电器。

#### Application and development of fault current limiter (FCL)

CHEN Jin-xiang<sup>1</sup>, DONG En-yuan<sup>2</sup>, ZOU Ji-yan<sup>2</sup>

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Dalian University of Science and Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** In this paper, it presents the FCL's definition and technical requirement, compares the principle and character of all kinds of solid-state FCLs, and discusses their advantage and disadvantage as well as their future situation.

**Key words:** FCL